

공중화분에 의한 시정장애 현상의 물리적 및 화학적 특성 규명

Physico-Chemical Characteristics of Visibility Impairment by Airborne Pollen

김 경 원*

경주대학교 건설환경공학부

(2006년 4월 17일 접수, 2006년 8월 24일 채택)

Kyung Won Kim*

School of Constructional and Environmental Engineering Gyeongju University

(Received 17 April 2006, accepted 24 August 2006)

Abstract

Intensive visibility monitoring was conducted to investigate physical and chemical characteristics of visibility impairment by airborne pollen. Light attenuation coefficients were optically measured by a transmissometer, a nephelometer, and an aethalometer. Elemental, ionic, and carbonaceous species were chemically analyzed on the filters collected by PM_{2.5} and PM₁₀ samplers. Aerosol size distribution was analyzed using a cascade impactor during airborne pollen period. Airborne pollen count was calculated using a scanning electron microscope. Airborne pollen was emitted into the atmosphere in springtime and further degraded visibility through its scattering and absorbing the light. Average light extinction coefficient was measured to be $211 \pm 36 \text{ Mm}^{-1}$ when airborne pollen was not observed. But it increased to $459 \pm 267 \text{ Mm}^{-1}$ during the airborne pollen period due to increase of average PM_{2.5} and PM₁₀ mass concentration and relative humidity and airborne pollen count concentration for PM₁₀, which were measured to be $46.5 \pm 29.1 \mu\text{g m}^{-3}$, $97.0 \pm 41.7 \mu\text{g m}^{-3}$, $54.1 \pm 11.6\%$, and $68.2 \pm 89.7 \text{ m}^{-3}$, respectively. Average light extinction efficiencies for PM_{2.5} and PM₁₀ were calculated to be 5.9 ± 0.9 and $4.5 \pm 0.8 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ during the airborne pollen period. Light extinction efficiency for PM₁₀ increased further than that for PM_{2.5}. The average light extinction budget by airborne pollen was estimated to be about 24% out of the average measured light extinction coefficient during the airborne pollen period.

Key words : Pollen, Optical properties, Light extinction, Natural sources

1. 서 론

대도시의 심각한 시정장애 (visibility impairment)

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)54-770-5390, E-mail : kwkim@gnu.ac.kr

현상은 인위적인 대기오염물질에 의해서만 유발되는 것이 아니라 자연적인 배출원으로부터 발생된 부유물질에 의해서도 영향을 받는다. 자연적인 부유물질 중의 하나가 공중화분 (airborne pollen)이다. 화분은 식물의 종류에 따라 다양한 형태를 가지고 있어 19세기 초부터 많은 학자들에 의하여 생물학적인 관점

에서 연구되었으며, 20세기 후반에는 대기 중에 비산된 화분의 인체유해성에 관한 연구로 그 범위가 확대되어 왔다 (Puc and Wolski, 2002; Lee, 1997; Park *et al.*, 1994; Doskey and Ugoagwu, 1989; Kanchan and Jayachandra, 1980; Stark, 1972; Goldstein, 1960). 그러나 공중화분에 의한 시정장애 현상에 대한 연구는 전 세계적으로 미개척된 연구 분야로써 최근에 이르러 대기오염을 유발시키는 자연적인 원인물질 중의 하나로 관심을 얻고 있다.

우리나라에서는 매년 봄철과 가을철에 주로 화초, 곡초, 목초, 잡초, 수목에서 발생한 공중화분을 쉽게 관측할 수 있다. 화분은 종자식물의 수술의 꽃밥 속에 만들어지는 웅성의 생식세포이며, 특히 소나무의 화분인 송화화분은 두 개의 공기주머니인 기낭을 이용하여 바람을 타고 쉽게 부유하여 멀리 이동한다 (Kim, 1985). 일반적으로 우리나라의 공중화분은 연 2회중 4월과 5월에 걸쳐 절정기를 보인다. 봄철의 공중화분은 주로 오리나무, 포플러, 버드나무, 소나무, 느릅나무 등의 수목화분에 의해서 발생되고, 가을철의 공중화분은 썩, 돼지풀, 환삼덩굴 등의 잡초화분에 의해서 발생된다 (Oh *et al.*, 1998; Min, 1984; 장남기와 임영득, 1979). 화분의 모양은 구형, 난형, 타원형 등 중에 따라 다르고, 소나무의 화분처럼 표면에 부속물이 달려 있는 것도 있다. 지름이 10 μm 이하가 되는 작은 것도 있고 100 μm 이상되는 큰 것도 있으나 주로 10~50 μm 사이가 가장 많이 존재한다 (Moore *et al.*, 1991). 특히 대기 중에 비산된 공중화분은 인위적인 대기오염물질들(황산염, 질산염, 유기물, 원소탄소 등)과의 물리적 부착 및 응집 또는 화학적 반응에 의해 변형됨으로써 공중화분의 자연적 배출원의 특성이 변질되기도 한다 (Kim, 2003).

변질된 공중화분은 도시지역 시정장애 현상을 보다 악화시키는 매개체로써 작용한다. 우리나라 시정장애 현상의 주요 대기오염물질들인 황산염 (sulfates), 질산염 (nitrates), 유기물 (organics) 입자들은 일반적으로 빛에 대한 산란이 매우 강하여 흰색으로 발현된다. 그러나 순수한 공중화분의 빛깔은 외막 표면에 있는 색소에 따라 황색, 적색, 녹색, 자색, 남색 등이 있어서 빛을 산란시킬 수 있으며 동시에 흡수할 수 있는 광학적 특성을 지닌다. 이런 특성은 에어로졸의 단위 질량당 빛소멸효율 (light extinction efficiency)을 정량함에 있어 빛에 대한 산란 (scattering)과 흡수

(absorption)를 동시에 측정해야 할 필요성을 제시하였으나 (Kim, 2003), 아직 규명된 바가 없을 뿐만 아니라 공중화분의 입경분포에 따른 빛산란효율 (light scattering efficiency)도 광학적인 접근법에 의하여 연구된 바가 없다.

매년 봄이 되면 공중화분으로 인해 도시지역뿐만 아니라 비도시지역에서도 시정은 더욱 악화된다. 대도시의 시정장애 현상을 개선하기 위해서는 자연적 오염원의 기여도를 우선적으로 파악한 후에 인위적 오염원으로부터 발생된 오염물질들의 기여도를 조사하는 것이 바람직하다. 따라서 공중화분의 빛에 대한 소멸현상을 측정 및 분석함으로써 자연적 오염원인 공중화분의 광·화학적 특성을 규명하는 것이 본 연구의 목적이다.

2. 측정 및 분석 방법

화분의 비산은 빛, 기온 및 상대습도 등에 영향을 받는다. 화분은 개화하기에 충분한 빛과 기온이 수일간 유지되면 비산하기 시작하며, 강우 후의 낮은 상대습도에서 비산의 절정기를 이룬다 (Lee *et al.*, 2003; Hofman and Michalik, 1998; Franciso and Candau, 1997; Frenguelli *et al.*, 1991; Agashe and Alfadil, 1989). 본 연구에서는 공중화분의 관측을 위하여 4월 21일부터 5월 2일까지 집중관측이 실시되었다. 공중화분의 관측을 위하여 서울시 전농동 소재의 서울시립대학교 옥상에 광·화학적 관측 장비가 설치되었다. 광학적 관측 장비는 Optec Inc.사 LPV-2 transmissometer, Optec Inc.사 NGN-2 및 NGN-3 nephelometer, Magee Scientific사 AE-16U aethalometer가 도입되었으며, 화학적 관측 장비는 URG사 PM_{2.5} 및 PM₁₀ cyclone, Sunset Lab.사 semi-continuous OC/EC field instrument, MOUDI (micro orifice uniform deposit impactor) 다단분진포집기 (cascade impactor)가 도입되었다. Transmissometer는 해발 71 m 서울시립대학교 옥상에 receiver unit이 설치되었으며, receiver unit으로부터 북서쪽으로 0.76 km 떨어진 빌딩 옥상에 transmitter unit이 설치되었다. 관측소의 위치를 그림 1에 나타내었다.

Transmissometer의 검정은 MODTRAN 모델을 활용한 개선된 ND-filter 방법으로 수행되었다 (Kim and

Kim, 2005). 빛소멸계수 (light extinction coefficient: b_{ext})는 transmissometer에 의하여 1분 간격으로 측정되었으며, 빛산란계수 (light scattering coefficient: b_{scat})는 nephelometer에 의하여 2분 간격으로 측정되었다. 대기 중에 부유하는 습윤입자 (wet particles)의 전체 입경분포에 대한 빛산란계수 ($b_{scat,TSP}$)는 NGN-2 nephelometer에 의하여 개광경로 (open path)에서 측정되었으며, 입경이 $2.5 \mu m$ 이하인 건조입자 (dry particles)에 의한 빛산란계수 ($b_{scat,dryPM_{2.5}}$)는 $PM_{2.5}$ spiral impactor가 도입부에 설치된 NGN-3 nephelometer에 의하여 외기와의 기온차를 $10^{\circ}C$ 이내로 유지하면서 장치 실내를 건조시켜 측정되었다. Nephelometer는 purge gas와 span gas를 사용하여 암검정 (zero calibration) 및 범위검정 (span calibration)이 실시되었다. 빛흡수계수 (light absorption coefficient: $b_{abs,PM_{2.5}}$)는 도입부에 $PM_{2.5}$ impactor가 설치된 aethalometer에 의

하여 1분 간격으로 측정되었다. 유기탄소와 원소탄소 (organic carbon & elemental carbon: OC & EC)는 도입부에 $PM_{2.5}$ impactor가 설치되고 가스상 유기탄소를 제거하기 위하여 CIF-denuder (carbon impregnated filter denuder)가 설치된 semi-continuous OC/EC field instrument에 의하여 1시간 간격의 준실시간 (semi-continuous)관측으로 측정되었다. 45분 동안 포집된 시료는 온도의 증가에 따른 시료의 투과도를 고려하여 15분 동안 NIOSH-5040 (National Institute of Occupational Safety and Health) 프로토콜을 기초로 한 열·광학적 투과법 (thermal-optical transmittance method: TOT)을 활용하여 분석되었다. $PM_{2.5}$ 및 PM_{10} cyclone에 의해 24시간 간격으로 포집된 미세입자 ($D_p < 2.5 \mu m$) 및 PM_{10} 입자 ($D_p < 10 \mu m$)는 원소 및 이온분석이 실시되었다. 원소분석을 위하여 Gelman사 47 mm 2 μm pore Teflon filter를 사용하여 왕수법으로 추출한 후 ICP/MS & /AES의 두 가지 방법으로 Na, Mg, Al, Si, S, Cl, K, Ca, Ti, V, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Br, Pb를 정량하였다. 이온분석을 위하여 Gelman사 47 mm 2 μm pore Teflon filter를 사용하여 입자를 포집한 후 Dionex-120 IC (Ion Chromatograph)를 사용하여 SO_4^{2-} , NO_3^- 및 NH_4^+ 를 정량하였다. 가스상 물질은 242 mm 및 150 mm annular denuder를 사용하여 필터에 포집되기 전에 제거되었다. 산성가스 (SO_2 , HCl)의 제거를 위해서는 1% Na_2CO_3 +1% glycerin+(H_2O+CH_3OH)의 함침액이 사용되었으며, 염기성가스 (NH_3)의 제거를 위해서는 1% citric acid+1% glycerin+(H_2O+CH_3OH)의 함침액이 사용되었다. MOUDI 다단분진포집기의 절단 입경 (cut point diameter)은 18, 10, 5.6, 3.2, 1.8, 1.0, 0.56, 0.32, 0.18 μm 로 30 lpm (liter per minute)의 유량

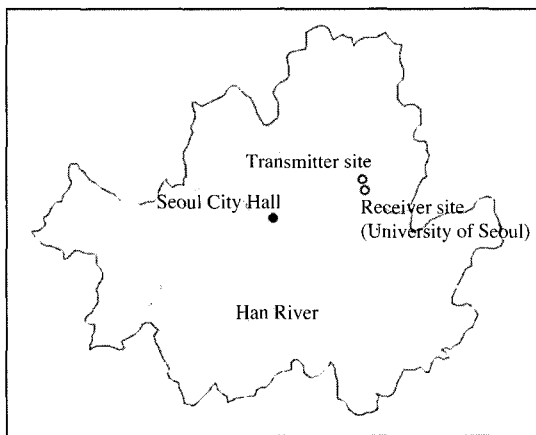


Fig. 1. Image map of the study area in Seoul.

Table 1. Measurement condition for visibility monitoring during the intensive monitoring period.

Monitoring type	Instrument	Particle size	Measurement parameter	Analytical method
Optical	LPV-2 transmissometer	$D_p > 0 \mu m$	b_{ext}	Light extinction
	NGN-2 nephelometer		$b_{scat,TSP}$	Light scattering
	NGN-3 nephelometer	$D_p < 2.5 \mu m$	$b_{scat,dryPM_{2.5}}$	Light scattering
	AE-16U aethalometer		$b_{abs,PM_{2.5}}$	Light absorption
Chemical	URG $PM_{2.5}$ cyclone	$D_p < 2.5 \mu m$	$PM_{2.5}$	Gravimetric analysis (mass) IC analysis (sulfate & nitrate ions)
	URG PM_{10} cyclone	$D_p < 10 \mu m$	PM_{10}	ICP/MS & ICP/AES analysis (Na~Pb)
	Sunset OC/EC analyzer	$D_p < 2.5 \mu m$	OC/EC	Thermal-optical transmittance method
	MOUDI	$0.18 < D_p < 18 \mu m$	-	Gravimetric analysis (mass)

으로 24시간 간격으로 대기 중 에어로졸이 포집되었다. 본 연구에 도입된 관측장비 및 측정항목에 관한 내용을 표 1에 요약하였다.

공중화분의 광·화학적 특성을 규명하기 위하여 본 연구에서는 주사전자현미경 (scanning electron microscope) 분석법이 도입되었다. 공중화분의 화학적 성분은 탄소, 수소, 질소, 황, 인 등으로써 인위적인 대기오염물질들의 성분과 유사하기 때문에 화학적 성분만으로는 대기오염물질들과 혼합된 시료로부터 공중화분의 성분만을 분별하여 정량할 수 없다. 본 연구에서는 주사전자현미경을 이용하여 공중화분의 개수를 측정함으로써 수농도 (number concentration)가 파악되었다. 채집된 에어로졸의 현미경 분석은 47 mm 필터의 실제 포집영역인 39 mm 원형 필터로부터 3 mm 구경으로 13개의 원형 샘플을 무작위로 채취하여 Hitachi사 model S-2300 주사전자현미경으로 공중화분의 개수를 정량하였다. 평균 공중화분 개수 (P: airborne pollen count)는 3 mm 원형 샘플에서 관측된 화분의 개수의 산술평균과 면적비의 곱으로 계산되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1 물리적 특성

2005년 4월 19일부터 강우 후 5월 2일까지 집중

관측 기간 관측된 빛소멸계수의 시계열 변화를 그림 2에 나타내었다. 4월 19일 강우에 의하여 빛소멸계수는 400~2,000 Mm^{-1} 까지 증가하였으며, 20일 새벽에 강우가 그친 후 200 Mm^{-1} 이하로 감소하였다. 일평균 빛소멸계수는 4월 21일 $255 \pm 32 Mm^{-1}$ 에서 지속적으로 감소하여 4월 24일에는 $197 \pm 62 Mm^{-1}$ 까지 낮아졌다. 강우 후 상대습도는 점차 낮아져 4월 23일 일평균 상대습도가 40.8%를 나타내었다. 공중화분이 개화하기에 적절한 기상조건이 형성되면서 4월 25일부터 공중화분이 관측되었다. 총 집중관측 기간 10일 중 공중화분이 관측된 날은 4월 25일, 26일, 28일, 29일, 30일, 5월 1일의 6일 이었다. 일평균 빛소멸계수는 4월 25일에 $319 \pm 123 Mm^{-1}$ 로 증가하여 4월 28일에는 $920 \pm 296 Mm^{-1}$ 로 최대를 나타내었으며, 이후 점차 감소하여 5월 1일에는 $266 \pm 35 Mm^{-1}$ 로 감소하였다. 공중화분이 관측된 기간의 평균 빛소멸계수는 $459 \pm 267 Mm^{-1}$ 로 공중화분이 관측되지 않았던 기간 동안의 평균 빛소멸계수인 $211 \pm 36 Mm^{-1}$ 보다 2.2배 높았다. 대조한계를 0.02로 가정하여 Koschmieder 계산식 (Koschmieder, 1924)에 의하여 시정거리로 환산한 결과에 따르면, 집중관측 기간 동안 일평균 시정거리는 6.2~16.8 km 범위를 나타내었으며, 관측기간 평균 시정거리는 $10.9 \pm 6.5 km$ 이었다. 공중화분이 관측되었던 기간 동안의 평균 시정거리는 $8.5 \pm 4.6 km$ 로 공중화분이 관측되지 않았던 기간 동안의 평균 시정거리인 $18.5 \pm 3.3 km$ 보다 약

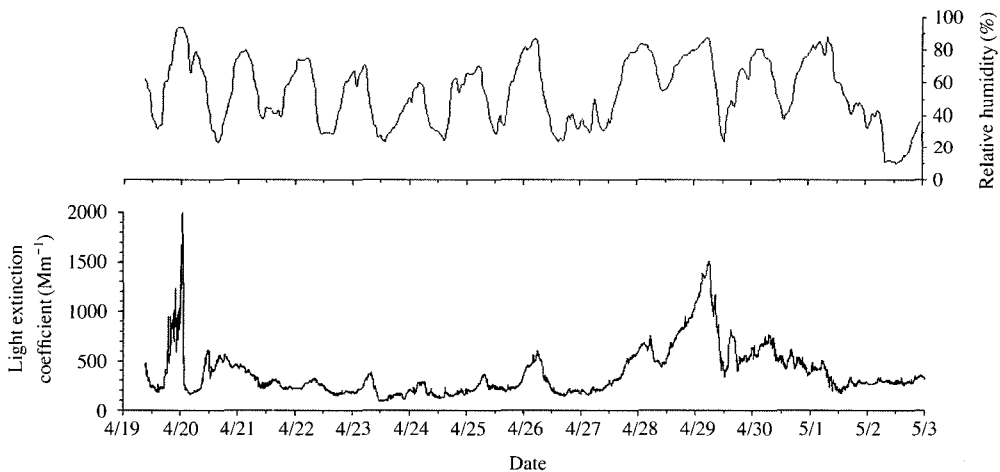


Fig. 2. Temporal variation of measured light extinction coefficient and relative humidity during the intensive monitoring period.

0.5배 낮았다.

시정거리의 감소는 빛소멸계수의 증가에 기인하며, 빛소멸계수의 증가는 빛의 산란 및 흡수를 유발시킬 수 있는 입자상 및 가스상 물질의 농도의 증가와 친수성 입자의 흡습성에 의한 입자의 물리적 성장으로부터 영향을 받는다 (Kim *et al.*, 2001; Tang, 1996). 공중화분이 관측된 기간 동안의 빛소멸계수의 증가의 원인을 조사하기 위하여, 상기에 언급된 두 가지 유발 요소 중 입자의 물리적 성장을 유도하는 상대습도의 변화가 조사되었다. 집중관측 기간 평균 상대습도는 $54.1 \pm 11.6\%$ 이었으며, 공중화분이 관측된 기간 동안의 평균 상대습도는 $57.4 \pm 13.6\%$ 로 공중화분이 관측되지 않은 기간 동안의 평균 상대습도인 $49.1 \pm 6.3\%$ 보다 약 8% 높았다. 공중화분이 관측된 기간 동안 상대습도에 의한 입자의 산란효율의 증가가 빛소멸계수의 증가에 기여하였다. 그러나 해당 상대습도의 증가에 의한 빛산란계수의 증가가 211 Mm^{-1} 에서 459 Mm^{-1} 의 증가를 온전히 유도한 것이라 할 수는 없다. Tang (1996)이 제시한 친수성 입자의 상대습도에 따른 빛산란효율의 변화를 충분히 고려하더라도 상대습도 49.1%에서 약 8%의 상대습도의 증가가 2배 이상의 빛소멸계수의 증가를 유도하기 위해서는 빛의 산란 및 흡수를 유발시킬 수 있는 시정장애 유발물질의 증가가 동반되어야 할 것으로 추정되었다.

집중관측 기간 동안 관측된 $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 영역의 입자상 물질의 질량농도와 각 입경영역에서 관측된 공중화분의 수농도의 변화를 표 2에 나타내었다. 관측기간 동안 24시간 평균 PM_{10} 입자의 질량농도는 최저 $47.9 \mu\text{g m}^{-3}$ 에서 최고 $169.0 \mu\text{g m}^{-3}$ 까지 변화하였으며, 관측기간 평균 PM_{10} 입자의 질량농도는 $84.2 \pm 36.8 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 측정되었다. PM_{10} 입자에 대한 $\text{PM}_{2.5}$ 입자의 질량농도 비(Ratio)는 0.45 ± 0.11 로 $\text{PM}_{2.5}$ 입자가 PM_{10} 입자의 약 45%의 분율을 나타내었다. 24시간 평균 $\text{PM}_{2.5}$ 입자의 질량농도는 최저 $18.3 \mu\text{g m}^{-3}$ 에서 최고 $101.4 \mu\text{g m}^{-3}$ 까지 변화하였으며, 관측기간 평균 $\text{PM}_{2.5}$ 입자의 질량농도는 $38.2 \pm 24.7 \mu\text{g m}^{-3}$ 로 측정되었다. 공중화분이 관측된 기간 동안의 $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 입자의 평균 질량농도는 각각 $46.5 \pm 29.1 \mu\text{g m}^{-3}$ 과 $97.0 \pm 41.7 \mu\text{g m}^{-3}$ 으로 공중화분이 관측되지 않은 기간 동안의 $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 입자의 평균 질량농도인 $25.8 \pm 9.0 \mu\text{g m}^{-3}$ 과 $65.0 \pm 18.4 \mu\text{g m}^{-3}$ 보다

각각 약 1.8과 1.5배 컸다. 대기 중 입자상 물질의 증가는 직접적으로 빛소멸계수의 증가를 유도하는 것으로 보고된 바 있다 (NARSTO, 2003). 따라서 공중화분이 관측된 기간 동안의 $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 입자의 질량농도의 증가가 빛소멸계수의 증가에 기여하였음이 확인되었다. 공중화분이 관측된 기간 동안 대기 중 입자상 물질의 질량농도의 증가는 공중화분의 수농도의 증가를 포함한다. 표 2에서와 같이 2005년 4월 21일부터 4월 24일까지는 공중화분이 관측되지 않았으나, 4월 25일부터 $\text{PM}_{2.5}$ 영역에서 관측된 공중화분의 수농도($P_{\text{PM}_{2.5}}$)와 PM_{10} 영역에서 관측된 공중화분의 수농도($P_{\text{PM}_{10}}$)가 각각 $2.3 \pm 0.7 \text{ m}^{-3}$ 과 $15.3 \pm 2.3 \text{ m}^{-3}$ 으로 측정되었고, 4월 28일에는 $P_{\text{PM}_{2.5}}$ 와 $P_{\text{PM}_{10}}$ 이 각각 $21.0 \pm 5.3 \text{ m}^{-3}$ 과 $269.2 \pm 34.7 \text{ m}^{-3}$ 으로 최대를 나타낸 후 점차 감소하여 5월 1일에는 각각 $5.6 \pm 1.9 \text{ m}^{-3}$ 과 $130.5 \pm 16.4 \text{ m}^{-3}$ 으로 측정되었다. 관측기간 동안 평균 $P_{\text{PM}_{2.5}}$ 와 $P_{\text{PM}_{10}}$ 는 각각 $5.0 \pm 6.7 \text{ m}^{-3}$ 과 $68.2 \pm 89.7 \text{ m}^{-3}$ 으로 측정되었다. 공중화분은 빛에 대한 산란 및 흡수 현상을 동시에 발현할 수 있는 에어로졸이므로 공중화분이 관측된 기간 동안의 빛소멸계수의 증가는 $\text{PM}_{2.5}$ 및 PM_{10} 입자의 질량농도의 증가를 수반하는 공중화분의 수농도의 증가에도 기인했을 것으로 추정되었다.

집중관측 기간 동안 관측된 공중화분의 입경분포를 조사하기 위하여 MOUDI 다단분진포집기가 도입

Table 2. Physical properties of aerosol collected in the $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} regime during the intensive monitoring period.

Date	$P_{\text{PM}_{2.5}}$ *	$P_{\text{PM}_{10}}$	$\text{PM}_{2.5}$	PM_{10}	Ratio ($\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$)
	m^{-3}		$\mu\text{g m}^{-3}$		
2005-04-21	0.0	0.0	37.9	75.6	0.50
2005-04-22	0.0	0.0	19.6	85.4	0.23
2005-04-23	0.0	0.0	18.3	47.9	0.38
2005-04-24	0.0	0.0	27.4	51.1	0.54
2005-04-25	2.3 ± 0.7	15.3 ± 2.3	33.8	66.0	0.51
2005-04-26	3.2 ± 1.1	29.0 ± 7.8	27.5	53.4	0.51
2005-04-28	21.0 ± 5.3	269.2 ± 34.7	101.4	169.0	0.60
2005-04-29	7.6 ± 2.6	112.2 ± 13.2	53.2	113.7	0.47
2005-04-30	10.4 ± 2.1	126.0 ± 21.9	41.8	101.9	0.41
2005-05-01	5.6 ± 1.9	130.5 ± 16.4	21.5	78.2	0.27
Avg.	5.0	68.2	38.2	84.2	0.45
Std.	6.7	89.7	24.7	36.8	0.11

*: Pollen count concentration in the $\text{PM}_{2.5}$ regime, $P_{\text{PM}_{10}}$: Pollen count concentration in the PM_{10} regime.

되었다. 공중화분이 관측된 기간 중 4월 28일부터 5월 1일까지 측정된 에어로졸의 질량농도와 관측된 공중화분의 수농도의 입경별 분포 변화를 그림 3에 나타내었다. PM₁₀ 영역에서 관측된 공중화분의 수농도가 최대를 나타내었던 4월 28일의 입경분포별 에어로졸의 질량농도와 공중화분의 수농도의 총합은 각각 175.9 μg m⁻³과 230.8 m⁻³으로 측정자료 중 최대를 나타내었다. 4월 28일 절단입경범위 10~18 μm에서 관측된 에어로졸의 질량농도는 전체의 24.4%를 차지하였으며, 공중화분의 수농도는 40.1%를 차지하였다. 5.6~10 μm에서 관측된 질량농도 및 수농도의 분율은 각각 21.3%와 31.7%이었으며, 3.2~5.6 μm에서는 각각 11.2%와 17.6%로 절단입경범위 3.2~18 μm에서 관측된 질량농도 및 수농도가 각각 전체의 56.8%와 89.4%를 차지하였다. 총 관측기간 동안 조대입자 영역인 절단입경범위 10~18 μm에서

관측된 에어로졸의 평균 질량농도 및 공중화분의 평균 수농도는 각각 28.2±9.8 μg m⁻³과 95.9±39.3 m⁻³이었고, 5.6~10 μm에서는 각각 22.1±10.7 μg m⁻³과 77.9±29.8 m⁻³이었으며, 3.2~5.6 μm에서는 각각 12.0±5.2 μg m⁻³과 36.3±23.5 m⁻³이었다. 그러나 미세입자 영역인 절단입경범위 1.0~1.8 μm에서 관측된 에어로졸의 평균 질량농도 및 공중화분의 평균 수농도는 각각 11.4±4.7 μg m⁻³과 4.1±2.3 m⁻³으로 감소하였으며, 0.56~1.0 μm에서는 각각 14.8±7.1 μg m⁻³과 0.6±0.6 m⁻³이었고, 절단입경 0.56 μm 이하에서는 공중화분이 관측되지 않았다. 따라서 집중 관측 기간 동안 관측된 공중화분의 수농도는 미세입자 영역보다 절단입경범위가 상대적으로 큰 조대입자 영역에서 컸으며, 공중화분의 증가가 에어로졸의 질량농도의 증가를 유도하였음이 확인되었다. 결과적으로 공중화분이 관측된 기간 동안의 빛소멸계수의

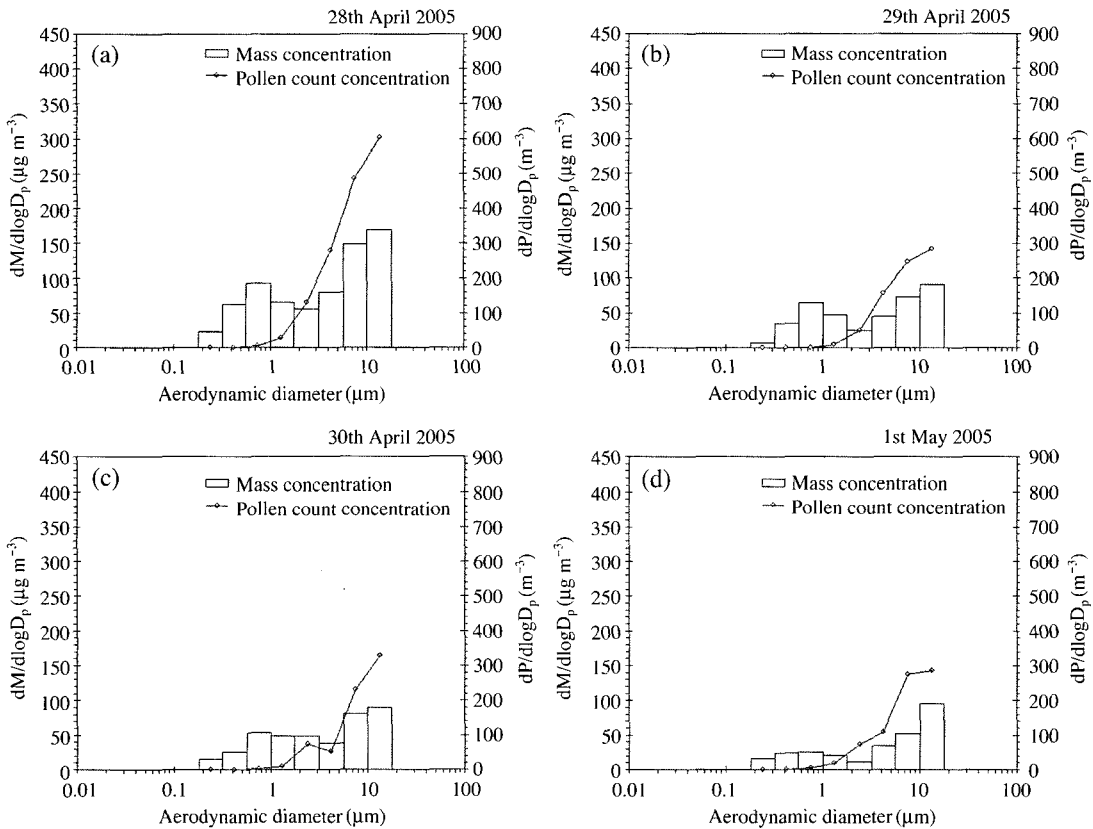


Fig. 3. Size distribution of mass concentration (M) and pollen count concentration (P) measured during the airborne pollen period. D_p means aerodynamic diameter.

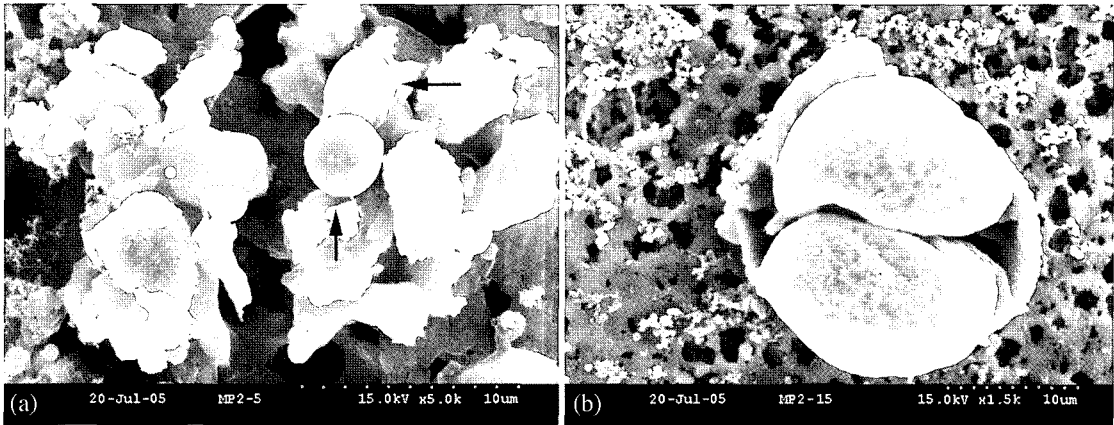


Fig. 4. Images of airborne pollens scanned using a scanning electron microscope in this study.

증가는 에어로졸의 질량농도의 증가뿐만 아니라 공중화분의 수농도의 증가가 동반되어 유도된 것으로 사료된다.

공중화분은 입경크기, 형태, 무늬, 색깔 등의 물리적 특성에 따라 분류된다(Moore *et al.*, 1991). 주사전자현미경을 이용하여 촬영된 사진은 공중화분의 물리적 특성을 쉽게 파악할 수 있으므로 공중화분의 종별 특성뿐만 아니라 대기 중 에어로졸의 물리적 특성과 확연하게 분별된다. 주사전자현미경을 이용하여 공중화분이 관측된 기간에 포집된 공중화분의 사진을 그림 4에 나타내었다. 그림 4의 (a)는 PM_{2.5} 영역 포집 필터에서 관측된 공중화분의 사진으로 구형(sphere type) 화분으로 분류되며, 그림 4의 (b)는 PM₁₀ 영역 포집 필터에서 관측된 공중화분의 사진으로 1개 이상의 유낭을 지닌 낭형(sac type) 화분으로 분류된다. 화살표로 표기되어진 PM_{2.5} 영역 포집 필터에서 관측된 공중화분은 직경이 약 2 μm 정도로 주변 에어로졸의 불규칙한 형상과는 달리 매끈한 구형으로 외부혼합(external mixture) 형태를 이루고 있다. PM₁₀ 영역 포집 필터에서 관측된 공중화분은 직경이 10 μm보다 크며, 공기의 부력을 이용할 수 있는 2개의 기낭을 지닌 소나무의 화분으로 사료된다.

3.2 광·화학적 특성

시정장애 현상은 대기 중에서 빛이 입자상 및 기상 물질들에 의하여 산란되거나 흡수되어 나타나는 현상이다(Malm, 1979). 이 두 가지 광학적 현상은 기

본적으로 입사된 빛의 파장에 따라서 변하며, 동일 파장에 대해서는 입자의 크기 및 성분에 의하여 좌우된다. 도시지역의 대기 중에는 주로 미세입자(fine particle; $D_p < 2.5 \mu\text{m}$)가 조대입자(coarse particle; $2.5 < D_p < 10 \mu\text{m}$)에 비하여 상대적으로 많이 존재하며, 미세입자의 증가가 같은 질량의 조대입자에 비하여 시정악화에 크게 영향을 미친다(Kreisberg *et al.*, 2001; Li *et al.*, 1996). 에어로졸의 시정장애 현상에 대한 효과는 에어로졸의 질량농도와 빛소멸계수의 변화를 측정함으로써 정량할 수 있다. 에어로졸이 대기 중에서 빛을 소멸시킬 수 있는 효과인 에어로졸의 빛소멸효율(light extinction efficiency)은 단위질량당 빛소멸계수의 증가량으로 계산된다. 집중관측 기간 동안 관측된 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 입자의 질량농도와 빛소멸계수간 상관관계를 나타낸 그림 5에서와 같이 공중화분이 관측된 사례에 대한 PM₁₀ 입자의 단위질량당 빛소멸효율($\sigma_{PM_{10}}$)이 공중화분이 관측되지 않았던 사례에 비하여 상대적으로 컸다. $\sigma_{PM_{10}}$ 은 공중화분이 관측된 사례가 $4.5 \pm 0.8 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 로 공중화분이 관측되지 않았던 사례에 비하여 약 $1.1 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 컸다. PM_{2.5} 입자의 단위질량당 빛소멸효율($\sigma_{PM_{2.5}}$)은 공중화분이 관측된 사례가 $5.9 \pm 0.9 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 로 공중화분이 관측되지 않았던 사례의 $5.6 \pm 1.4 \text{ m}^2 \text{ g}^{-1}$ 의 편차범위를 고려할 때 상대적으로 컸다고 단정하기 어려웠다. 공중화분은 외막 표면에 색을 띠고 있어서 빛을 산란시킬 수 있으며 동시에 흡수할 수 있는 광학적 특성을 지닌다. 이런 특성이 공중화분이 관측된 기간

동안의 $\sigma_{PM_{10}}$ 을 상승시키는 데 기여한 것으로 사료된다.

도시지역의 미세입자의 구성 성분 중에는 인위적인 대기오염물질들이 자연적인 대기오염물질들보다 상대적으로 많이 존재한다(John *et al.*, 1990). 시정장애에 영향을 미치는 대기오염물질의 화학적 조성 중 황산염입자, 질산염입자, 유기물입자, 원소탄소입자(elemental carbon) 및 이산화질소(NO_2) 가스들은 주로 인위적인 대기오염물질의 특성을 나타내며, 미세토양입자(fine soil)와 조대입자(coarse)는 주로 자연적인 대기오염물질의 특성을 나타낸다(IMPROVE,

2002). 따라서 시정장애를 유발시키는 입자상 및 가스상 물질들의 화학적 조성을 알면, 빛의 광학적 성질을 이용하여 각 시정장애 유발물질의 기여도를 정성 및 정량적으로 분석할 수 있다(Horvath, 1981; Friedlander, 1977; Henry, 1977). 공중화분은 자연적인 발생원으로부터 배출되는 대기 중의 에어로졸들 중 하나로서, 본 연구의 결과에 의하면, 미세입자 영역 및 조대입자 영역에서 모두 발견되었으며, 공중화분이 관측된 날의 시정장애 현상은 인위적인 각종 대기오염물질뿐만 아니라 자연적인 공중화분의 농도의 증가에도 기인한 것으로 분석되었다. 따라서 시정장애를 유발시키는 기존의 화합물들과 공중화분에 의한 빛소멸계수에 대한 기여도를 분석함으로써 자연적인 발생원으로부터 배출된 공중화분의 시정장애 현상에 대한 기여도를 파악할 수 있다.

시정장애를 유발하는 에어로졸 화합물의 빛소멸계수에 대한 기여도를 분석하기 위하여 포집된 에어로졸의 원소, 이온 및 탄소 분석이 수행되었다. 분석된 화합물의 농도는 표 3에 요약된 수정된 IMPROVE protocol(Kim *et al.*, 2001)을 이용하여 대기 중에 존재하는 암모늄이온으로 중화된 황산염입자를 황산암모늄($(NH_4)_2SO_4$: NHSO) 입자로 가정하고(Watson, 2002), 암모늄이온으로 중화된 질산염입자를 질산암모늄(NH_4NO_3 : NHNO) 입자로 가정하며(Chow *et al.*, 1996), 몰상관계수 1.4에 의하여 계산된 유기탄소 성분의 질량농도를 유기물(organic matter by carbon: OMC) 입자로 가정하고(Richard *et al.*, 2002; Turpin and Lim, 2001; White and Roberts, 1977), Al_2O_3 , SiO_2 , CaO , K_2O , FeO , Fe_2O_3 , TiO_2 등에 대하여 MgO ,

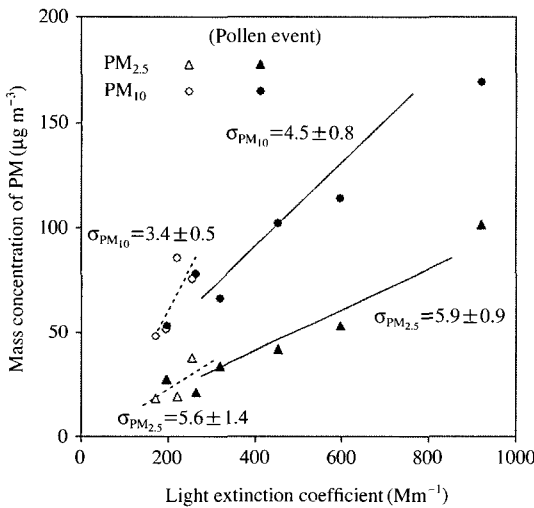


Fig. 5. Relationship between mass concentration of particulate matter and light extinction coefficient.

Table 3. Composite variables for aerosol composition for visibility study (Kim *et al.*, 2001).

Particle size range	Measurement	Component	Specifications	Composite equation
$D_p < 2.5 \mu m$	[$PM_{2.5}$]	NHSO	$(NH_4)_2SO_4$	$4.125[S]$
		NHNO	NH_4NO_3	$1.29[NO_3^-]$
		OMC	Organic mass by carbon	$1.4[OC]$
		EC	Elemental carbon	$[EC]$
		FS	Fine Soil	$2.20[Al]+2.49[Si]+1.63[Ca]+2.42[Fe]+1.94[Ti]$
$2.5 < D_p < 10 \mu m$	[PM_{10}] - [$PM_{2.5}$]	NHSO _c	$(NH_4)_2SO_4$ [nss- SO_4^{2-}]	$1.375\{[SO_4^{2-}]-0.25[Na]\}$
		SS	Sea-salt	$2.5[Na]$
		MD	Mineral dust	$[CM] - \{[NHSO_c] + [SS]\}$
		CM	Coarse mass	$[PM_{10}] - [PM_{2.5}]$
Gas phase		b_{NO_2}	Absorption coeff. by NO_2	$0.33[NO_2]_{ppb}$
		b_{Ray}	Rayleigh scattering coefficient	Altitude dependent

NaO, H₂O, carbonate 성분을 보정하여 계산된 질량농도를 미세토양 (fine soil: FS) 입자로 가정하여 (IMPROVE, 2002; Pettijohn, 1949) 시정장애 유발 에어로졸의 질량농도가 계산되었다. 해염입자 (sea-salt: SS)는 표 3에서와 같이 나트륨의 질량농도에 몰상관계수가 고려되어 계산되었으며, 미네랄입자 (mineral dust: MD)는 조대입자의 질량농도로부터 계산되었고, 조대입자는 PM₁₀ 입자와 PM_{2.5} 입자의 질량농도의 차로 계산되었다.

측정된 PM_{2.5} 및 PM₁₀ 입자의 질량농도와 재구성된 (reconstructed) PM_{2.5} 및 PM₁₀ 입자의 질량농도 간의 산포도를 그림 6에 나타내었다. 재구성된 질량농도는 각 입경영역별로 표 3에 요약된 구성요소의 합으로 계산되었다. 측정값을 기준으로 공중화분이 관측되지 않았던 사례의 평균 상대오차는 PM_{2.5} 입자 및 PM₁₀ 입자에 대하여 각각 10.6±9.4% 및 17.5±7.9%이었으나, 공중화분이 관측된 사례의 평균 상대오차는 각각 13.6±3.9% 및 42.2±10.9%로 공중화분이 관측된 사례에서 PM₁₀ 입자에 대한 평균 상대오차가 상대적으로 큰 것으로 분석되었다. 이런 현상은 주요 화학적 조성이 탄소, 수소 및 산소인 공중화분의 원소분석에서 수소와 산소가 분석되지 않았으며, 공중화분의 수증도가 조대입자 영역에서 높게 관측되어 해당 원소의 질량농도가 재구성된 PM₁₀의

질량농도를 계산하는 데에 고려되지 못했기 때문인 것으로 사료된다.

재구성된 PM₁₀의 질량농도의 화학적 특성을 조사하기 위하여 집중관측 기간 동안의 시정장애를 유발하는 전체 에어로졸의 질량농도에 대한 각 에어로졸 성분의 평균 조성비율이 공중화분이 관측되지 않은 사례와 관측된 사례로 분류되어 비교 분석되었다. 그림 7의 (a)는 공중화분이 관측되지 않은 사례에 대한 시정장애 유발 에어로졸의 평균 조성비율로써 MD의 질량농도가 전체의 53%로 가장 컸으며, NHSO, NHNO, OMC, EC, FS, NHSOc 및 SS의 질량농도는 각각 9, 5, 17, 4, 9, 2 및 1%인 것으로 분석되었다. 그림 7의 (b)에서와 같이 공중화분이 관측된 사례에 대한 각 에어로졸의 질량농도에 대한 평균 조성비율은 공중화분이 관측되지 않은 사례를 기준으로 NHSO, NHNO, FS, NHSOc, SS는 증가되었으며, MD는 감소되었고, OMC와 EC는 변화가 미약한 것으로 분석되었다. 공중화분이 관측된 사례에서, NHSO, NHNO, FS, NHSOc 및 SS의 조성비율은 각각 22, 12, 13, 5 및 2%을 차지함으로써 공중화분이 관측되지 않은 사례의 경우보다 각각 약 2.5, 2.4, 1.4, 2.5 및 1.9배 증가되었으며, MD의 조성비율은 25%로써 약 0.5배 감소되었다. 증가된 시정장애 유발 에어로졸 성분 중 NHSO와 NHNO는 식 (1)에서와 같이 단위질량당 빛소멸효율이 3 m² g⁻¹로 다른 에어로졸에 비하여 상대적으로 높으며, 친수성 입자로서 상대습도의 증가에 의하여 빛소멸효율이 증가할 수 있는 광학적 특성을 지니고 있다 (Tang, 1996). 공중화분이 관측된 사례의 평균 NHSO와 NHNO의 질량농도는 공중화분이 관측되지 않은 사례의 4.5와 2.9 μg m⁻³에서 각각 12.9와 7.0 μg m⁻³으로 증가되었다. 그러나 공중화분이 관측된 기간 동안의 평균 빛소멸계수가 공중화분이 관측되지 않았던 기간 동안의 평균 빛소멸계수보다 2.2배 높게 관측된 원인을 NHSO와 NHNO의 질량농도의 증가만으로 모두 설명하기에는 부족하다. 왜냐하면 단위질량당 빛소멸효율이 상대적으로 큰 OMC와 EC의 질량농도에 대한 조성비율에 변화가 미약하였으며, 조성비율이 증가되었던 FS, NHSOc 및 SS는 단위질량당 빛소멸효율이 각각 1.0, 1.0 및 0.4 m² g⁻¹로써 비교적 낮은 것으로 알려져 있기 때문이다 (김경원과 김영준, 2003; IMPROVE, 2002). 공중화분이 관측된 사례의 평균 OMC와 EC

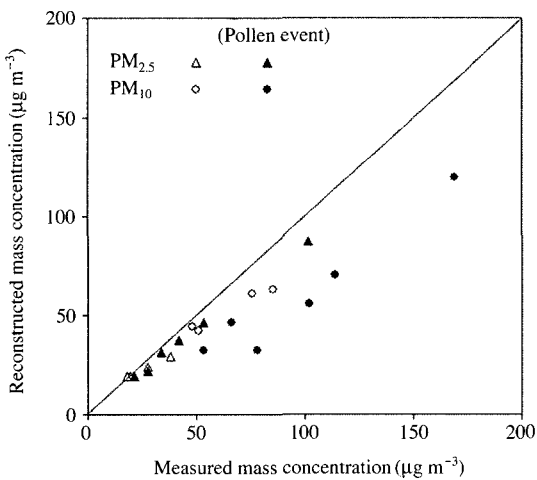


Fig. 6. Scatter plot of mass concentration of particulate matter between measured data and reconstructed data.

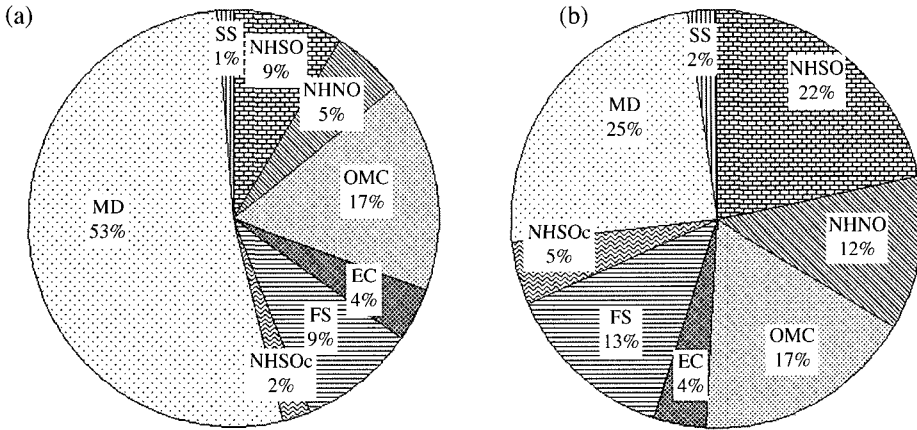


Fig. 7. Average mass concentration budgets for visibility impairing aerosol components during the intensive monitoring period; (a) the event airborne pollen was not observed, (b) the event airborne pollen was observed.

의 질량농도는 공중화분이 관측되지 않은 사례의 8.7과 2.1 $\mu\text{g m}^{-3}$ 에서 각각 10.4와 2.4 $\mu\text{g m}^{-3}$ 으로 소량 증가되었다.

$$b_{\text{ext}} = 3f(\text{RH})[\text{NHSO}] + 3f(\text{RH})[\text{NHNO}] + 4[\text{OMC}] + 10[\text{EC}] + 1[\text{FS}] + 0.4[\text{SS}] + 1.0[\text{NHSOc}] + 0.77[\text{MD}] + b_{\text{abs,NO}_2} + b_{\text{Ray}} \quad (1)$$

집중관측 기간 중 공중화분이 관측된 기간 동안의 빛소멸계수의 증가의 원인을 규명하기 위하여 시정장에 유발 에어로졸에 대한 재구성된 빛소멸계수의 시계열 변화가 분석되었다. 입자상 요소인 NHSO, NHNO, OMC, EC, FS, SS, NHSOc 및 MD와 가스상 요소인 NO₂와 Rayleigh 산란은 식 (1)에 의하여 계산되었다. 식 (1)은 표 3에서와 같이 여러 학자들에 의하여 제시된 이론적 근거를 토대로 결정된 관계식이다 (IMPROVE, 2002; Kim *et al.*, 2001). 시정장에 유발 에어로졸에 대한 빛소멸계수의 시계열 변화를 나타낸 그림 8에서와 같이, 공중화분이 관측된 4월 25일 이후로 빛소멸계수의 증가는 NHSO, NHNO, OMC, EC 및 FS에 의하여 증가되었으며, 특히 NHSO와 NHNO에 의한 빛소멸계수의 증가가 뚜렷하였다. 공중화분이 관측된 사례의 NHSO, NHNO, OMC, EC 및 FS에 의한 빛소멸계수는 공중화분이 관측되지 않은 사례의 빛소멸계수보다 각각 4.3, 3.7, 1.3, 1.3 및 1.8배 증가되었다. 또한 공중화분이 관측된 기간 동안의 자연적인 오염물질인 공중화분에 의한 시정장

에 현상의 기여도를 조사하기 위하여 그림 8에서와 같이 측정된 빛소멸계수와 재구성된 빛소멸계수 간의 차인 잔여빛소멸계수 ($b_{\text{ext,Residual}}$)가 계산되었다. $b_{\text{ext,Residual}}$ 은 공중화분이 관측되지 않은 사례에서는 5~49 Mm^{-1} 범위로 평균 $b_{\text{ext,Residual}}$ 가 $32 \pm 21 \text{ Mm}^{-1}$ 이었으나, 공중화분이 관측된 사례에서는 47~225 Mm^{-1} 범위로 평균 $b_{\text{ext,Residual}}$ 가 $141 \pm 71 \text{ Mm}^{-1}$ 인 것으로 분석되었다. 계산된 $b_{\text{ext,Residual}}$ 은 초대입경 영역의 에어로졸의 성분 중에서 질산염과 탄소입자 등이 빛소멸계수의 재구성에 고려되지 않았거나, 측정된 빛소멸계수가 과대평가되어 발생될 수 있다. 따라서 공중화분이 관측되지 않은 사례의 평균 $b_{\text{ext,Residual}}$ 만큼 상쇄 (offset)하고, 추가적으로 공중화분이 관측된 사례의 PM₁₀의 증가량에 비례하여 추정되는 질산염과 탄소입자에 의한 빛소멸계수의 증가량을 상쇄하고, 빛소멸계수의 측정오차를 상쇄하여 공중화분에 의한 빛소멸계수 양으로 가정할 수 있는 잔여 빛소멸계수가 계산될 수 있다. PM₁₀의 증가량에 비례하여 추정된 질산염과 탄소입자에 의한 빛소멸계수의 증가량은 $16 \pm 21 \text{ Mm}^{-1}$ 로 계산되었으며, Transmissometer의 빛소멸계수에 대한 측정오차는 $\pm 8 \text{ Mm}^{-1}$ 로 보고된 바 있다 (Kim *et al.*, 2004). 공중화분이 관측된 기간 동안 상쇄된 평균 $b_{\text{ext,Residual}}$ 은 $93 \pm 58 \text{ Mm}^{-1}$ 로 계산되었으며 공중화분이 관측된 기간 동안에 측정된 평균 빛소멸계수에 대하여 약 20.3 \pm 12.6%를 차지하였다. 공중화분이 관측된 기간 동안 공중화분은

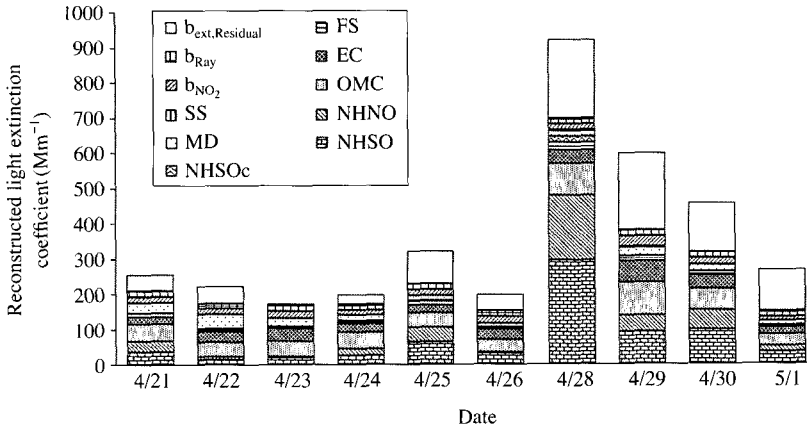


Fig. 8. Temporal variation of reconstructed light extinction coefficient for aerosol components during the intensive monitoring period.

PM₁₀ 영역에서 약 68 m⁻³의 수농도를 나타내었으며, 10 μm보다 큰 입경영역에 존재하는 공중화분의 수농도는 더 클 것으로 추정된다. 결과적으로 공중화분이 관측된 기간 동안의 빛소멸계수의 증가는 시정장애 유발 에어로졸의 증가에 의하여 유도되었으며, NHSO와 NHNO의 조성비율의 증가가 빛소멸계수의 증가에 지배적으로 기여하였으나, 측정된 빛소멸계수의 약 20%는 공중화분의 수농도의 증가에 기인한 것으로 추정된다.

4. 결 론

시정장애 현상을 유발시킬 수 있는 주요 원인물질은 인위적으로 발생된 대기오염물질들이지만 소수의 자연적으로 발생하는 에어로졸도 포함된다. 연중 특정한 시기에 자연적으로 발생하는 에어로졸인 공중화분은 인위적인 시정장애 유발물질과 동시에 대기 중에 부유되어 시정을 더욱더 악화시킨다. 그러나 이러한 현상을 규명할 수 있는 공중화분의 광학적 및 화학적 특성에 관한 연구는 공중화분이 비산되는 기간이 연중 수일에 불과하고, 광·화학적 관측을 위하여 종합적인 관측 장비가 도입되어야 하는 등의 난점으로 인하여 수행된 바가 매우 미흡하였다. 본 연구에서는 10일간의 집중관측 기간 중 공중화분이 관측된 6일간의 물리적 및 화학적 관측 자료를 토대

로 공중화분에 의한 시정장애 현상의 물리적, 광학적 및 화학적 특성이 조사되었다.

집중관측 기간 중 공중화분이 관측된 사례의 평균 빛소멸계수와 평균 시정거리는 각각 459±267 Mm⁻¹와 8.5±4.6 km로 공중화분이 관측되지 않은 사례의 평균 빛소멸계수와 평균 시정거리인 211±36 Mm⁻¹와 18.5±3.3 km에 비하여 약 2배 가량 악화된 시정을 나타내었다. 공중화분이 관측된 기간 동안 평균 상대습도는 54.1±11.6%로 공중화분이 관측되지 않은 기간보다 약 8% 높았으며, PM_{2.5} 및 PM₁₀ 입자의 평균 질량농도는 각각 46.5±29.1 μg m⁻³과 97.0±41.7 μg m⁻³으로 공중화분이 관측되지 않은 기간 동안보다 각각 약 1.8과 1.5배 컸고, 공중화분의 평균 수농도 P_{PM_{2.5}}와 P_{PM₁₀}는 각각 5.0±6.7 m⁻³과 68.2±89.7 m⁻³으로 측정되어, 공중화분이 관측된 기간 동안 악화된 시정의 원인이 상대습도의 증가와 공중화분을 포함한 입자상 물질의 증가에 기인한 것으로 분석되었다. 주사전자현미경을 이용하여 조사한 결과 관측된 공중화분의 물리적 형상은 구형과 낭형이었다. 공중화분은 외막 표면에 색을 띠고 있어서 빛을 산란시킬 수 있으며 동시에 흡수할 수 있는 광학적 특성을 지니고 있어 공중화분이 관측된 사례에 대한 PM₁₀ 입자의 단위질량당 빛소멸효율이 4.5±0.8 m² g⁻¹로 공중화분이 관측되지 않았던 사례에 비하여 약 1.1 m² g⁻¹ 컸다. 공중화분이 관측된 기간 동안 시정장애 유발 에어로졸 성분 중 NHSO와 NHNO의

질량농도는 뚜렷하게 증가되었으나 OMC와 EC의 질량농도는 소량 증가되었으며, 조대입자 영역에서 주로 관측된 공중화분의 주요 화학적 조성인 탄소, 수소 및 산소가 분석되지 않아 공중화분이 관측된 사례에서 측정된 PM₁₀ 입자의 질량농도에 대한 재구성된 PM₁₀ 입자의 질량농도의 평균 상대오차가 상대적으로 큰 것으로 분석되었다. 에어로졸의 빛소멸계수에 대한 기여도 분석에서는 공중화분이 관측되지 않은 사례의 평균 잔여빛소멸계수, 분석되지 않은 조대입자 영역의 질산염과 탄소입자에 의한 빛소멸계수의 증가량 및 빛소멸계수의 측정오차를 상쇄하여 재계산한 잔여빛소멸계수가 $93 \pm 58 \text{ Mm}^{-1}$ 로 계산되어 공중화분이 관측된 기간 동안 측정된 빛소멸계수의 약 20%는 공중화분의 수농도의 증가에 기인한 것으로 추정되었다.

감사의 글

이 논문은 2004년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며 (KRF-2004-041-D00390) 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 김경원, 김영준(2003) 에어로졸의 준실시간 관측에 의한 여름철 도시지역 시정 감쇄 현상의 광·화학적인 특성 분석, 한국대기환경학회지, 19(6), 647-661.
- 장남기, 임영득(1979) 한국화분도감, 서울대 출판부, 서울.
- Agashe, S.N. and A.G. Alfadil (1989) Atmospheric biopollutant monitoring in relation to meteorological parameters, Grana, 28, 97-104.
- Chow, J.C., J.G. Watson, Z. Lu, D.H. Lowenthal, C.A. Frazier, P.A. Solomon, R.H. Thuillier, K.L. Manliano (1996) Descriptive analysis of PM_{2.5} and PM₁₀ at regionally representative locations during SJVAQS/AUSPEX, Atmos. Environ., 30(12), 2079-2112.
- Doskey, P.V. and B.J. Ugoagwu (1989) Atmospheric deposition of macronutrients by pollen at a semi-remote site in northern Wisconsin, Atmos. Environ., 23, 2761-2766.
- Francisco, J.G.M. and P. Candau (1997) Olea europaea airborne pollen in southern Spain, Ann Allergy Asthma Immunol, 78, 278-284.
- Frenguelli, G., F.T.M. Spiessma, E. Bricchi, B. Romano, G. Mincigrucci, A.H. Nikkels, W. Dankart, and F. Ferranti (1991) The influence of air temperature on the starting dates of the pollen season of Alnus and Populus, Grana, 30, 196-200.
- Friedlander, S.K. (1977) Smoke, Dust and Haze, John Wiley & Sons.
- Goldstein, S. (1960) Degradation of pollen by phycomycetes, Ecology, 41, 543-545.
- Henry, R.C. (1977) The application of the linear system theory of visual acuity to visibility reduction by aerosols, Atmos. Environ., 11(8), 697-701.
- Hofman, T. and J. Michalik (1998) Alergia Pylkowa, TOM, Poznan.
- Horvath, H. (1981) Atmospheric visibility, Atmos. Environ., 15(10/11), 1785-1796.
- IMPROVE (2002) Interagency Monitoring of Protected Visual Environments Data Resources, National Park Service: Ft. Collins, CO. (is available on the website: <http://vista.cira.colostate.edu/IMPROVE>)
- John, W., S.M. Wall, J.L. Ondo, and W. Winklmayr (1990) Modes in the size distributions of atmospheric inorganic aerosol, Atmos. Environ., 24A(9), 2349-2359.
- Kanchan, S. and Jayachandra (1980) Pollen allelopathy-A New phenomenon, New Phytol., 84, 739-746.
- Kim, K.W. and Y.J. Kim (2005) Improvement of Field Calibration of a Transmissometer for Visibility Measurement J. KOSAE, 21(E2), 49-56.
- Kim, K.W., Z. He, and Y.J. Kim (2004) Physico-Chemical Characteristics and Radiative Properties of Asian Dust Particles Observed at Kwangju, Korea during the 2001 ACE-Asia IOP, J. Geophys. Res., 109, D19, D19S02.
- Kim, K.W. (2003) Physico-chemical characteristics of visibility impairment in an urban area & Development of a remote digital vision visibility monitor, Ph.D. thesis, Dept. of Environmental Science and Engineering, Kwangju Institute of Science and Technology, Korea.
- Kim, K.W., Y.J. Kim, and S.J. Oh (2001) Visibility impairment during Yellow Sand periods in the urban atmosphere of Kwangju, Korea, Atmos. Environ. 35-30, 5157-5167.
- Kim, N.I. (1985) A study on the Atmospheric pollen calendar in Mt. Kwan-Ak, M.S. thesis, Seoul National University.
- Koschmieder, V.H. (1924) Theorie der horizontalen sicht-

- weite II. Kontrast und sichtweite, Beitr. z. Phys. d. fr. Atmosph., 12, 171-181.
- Kreisberg, N.M., M.R. Stolzenburg, S.V. Hering, W.D. Dick, and P.H. McMurry (2001) A new method for measuring the dependence of particle size distributions on relative humidity, with application to the south-eastern aerosol and visibility study, *J. Geophys. Res.*, 106(D14), 14935-14949.
- Lee, E.J. (1997) Importance of pollen rain in boreal Manitoba, Canada, Ph.D. thesis, Dep. of Bot., University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba.
- Lee, E.J., Y.J. Cho, I.S. Kim, and P.G. Kim (2003) Deposition of airborne pine pollen in a temperate pine forest, *Grana*, 42(3), 178-182.
- Li, X., H. Maring, D. Savoie, K. Voss, and J.M. Prospero (1996) Dominance of mineral dust in aerosol light-scattering in the north Atlantic trade winds, *Nature*, 380, 416-419.
- Malm, W.C. (1979) Considerations in the measurement of visibility; *J. Air Pollut. Control Assoc.*, 29(10), 1042-1052.
- Min, K.U. (1984) Aero-biological and allergological study for airborne pollen in Seoul, Ph.D. thesis, Seoul National University.
- Moore, P.D., J.A. Webb, and M.E. Collinson (1991) *Pollen Analysis*, Oxford Blackwel.
- NARSTO (2003) An assessment of tropospheric ozone pollution a North American perspective. NARSTO Management Coordinator's Office (Envair), Pasco, Washington. (is available on the website: <http://www.cgenv.com/Narsto>).
- Oh, J.W., H.B. Lee, H.R. Lee, B.Y. Pyun, Y.M. Ahn, K.E. Kim, S.Y. Lee, and S.L. Lee (1998) Aerobiological study of pollen and mold in Seoul, Korea, *International Allergology*, 47, 263-270.
- Park, H.S., D.H. Chung, and Y.J. Joo (1994) Survey of airborne pollens in Seoul, Korea, *J. Korean Med. Sci.*, 9(1), 42.
- Pettijohn, F.J. (1949) *Sedimentary Rocks*, Harper & Brothers, New York.
- Puc, M. and T. Wolski (2002) Betula and Populus pollen counts and meteorological conditions in Szczecznica, Poland, *Ann Agric Environ Med*, 9, 65-69.
- Richard, T., L. Hildemann, R. Kamens, S. Lee, W.C. Malm, S. Pandis, J. Pankow, J. Schauer, J.G. Watson, and B. Zielinska (2002) Secondary Organic Aerosols Research Strategy to Apportion Biogenic/Anthropogenic Sources: An Outcome of the First Secondary Organic Aerosol Workshop, February 4-5, Desert Research Institute, Reno, Nevada, USA.
- Stark, N. (1972) Nutrient cycling pathways and litter fungi, *Bioscience*, 22, 355-360.
- Tang, I.N. (1996) Chemical and size effects of hygroscopic aerosols on light-scattering coefficients, *J. Geophys. Res.*, 101(D14), 19245-19250.
- Turpin, B.J. and H.J. Lim (2001) Species contributions to PM_{2.5} mass concentrations: revisiting common assumptions for estimating organic mass, *Aerosol Sci. Technol.*, 35(1), 602-610.
- Watson, J.G. (2002) Visibility: Science and regulation, *J. Air & Waste Manage. Assoc.*, 52, 628-713.
- White, W.H. and P.T. Roberts (1977) On the nature and origins of visibility-reducing aerosols in the Los Angeles air basin, *Atmos. Environ.*, 11(9), 803-811.